

令和 2 年 7 月 14 日現在

機関番号：15201

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2018～2019

課題番号：18K18951

研究課題名（和文）高エネルギー転位による鉄鋼材料の高強度・高延性化の新たな原理の開拓

研究課題名（英文）New strengthening mechanism of steels by high-energy dislocations

研究代表者

荒河 一渡（Arakawa, Kazuto）

島根大学・学術研究院理工学系・教授

研究者番号：30294367

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,800,000円

研究成果の概要（和文）：従来、フェライト系鉄鋼材料等のアルファ鉄系材料の塑性変形は、バーガースベクトルが $1/2\langle 111 \rangle$ の転位によって担われると考えられてきた。一方、「高エネルギー転位」である $\langle 100 \rangle$ 転位は、安定には導入できない転位として無視されてきた。しかし、主な転位の種類を $\langle 100 \rangle$ 転位に変えることによって、鉄を強化できると期待される。本研究では、鉄における「高エネルギー $\langle 100 \rangle$ 転位」の様々な性質を、透過電子顕微鏡法を駆使して明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

金属材料の塑性変形は、転位と呼ばれる線状の原子配置の乱れの動きによって担われる。従来、金属材料の強化は、転位の障害物（異種原子、析出物、粒界、他の転位）を利用するものであった。これに対して本研究は、転位の種類を変えてしまうことにより材料を強化するという、新しい材料強化法の原理の開拓を目指すところに学術的意義がある。この原理の実用化には多くの課題が残されているが、実用化に成功すれば、より低コストでより強い鉄鋼材料を創れると見込まれる。

研究成果の概要（英文）：It has been recognized that plastic deformation of alpha-iron based materials such as ferritic steels is governed by dislocations with the Burgers vector of  $1/2\langle 111 \rangle$ . In contrast, “high-energy”  $\langle 100 \rangle$  dislocations have been ignored because of their instability. However, it is expected that alpha-iron based materials can be strengthened by replacement of major dislocations with  $\langle 100 \rangle$  dislocations. In the present study, we have clarified various properties of “high-energy  $\langle 100 \rangle$  dislocations” in alpha-iron, using transmission electron microscopy.

研究分野：格子欠陥

キーワード：転位 材料強化 鉄鋼 電子顕微鏡

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

金属の塑性変形は、しばしば線状の結晶格子欠陥である転位の生成と移動によって担われる。したがって転位の挙動は金属のマクロな機械的性質を支配する。たとえば金属を強化するには、転位を動きにくくすればよい。

フェライト系鉄鋼材料等のアルファ鉄系材料の塑性変形は、転位芯の原子変位に対応する「バーガス・ベクトル」が最小の  $1/2\langle 111 \rangle$  である転位によって担われることがこれまでの常識であった。これに対し本研究では、「高エネルギー転位」としてその存在が無視されてきた、バーガス・ベクトルのより大きな  $\langle 100 \rangle$  転位に着目する。

もし主な転位の種類を「高エネルギー  $\langle 100 \rangle$  転位」とすることができれば、鉄の強度を顕著に増大させることができると期待される。 $\langle 100 \rangle$  転位はその移動度(移動のしやすさ)が  $1/2\langle 111 \rangle$  転位のそれに比べ極めて低いと考えられるためである。この「高エネルギー  $\langle 100 \rangle$  転位」による強化機構は、転位移動の抑制を固溶元素や析出物等の外的因子によって行う、従来の強化機構とは全く異なるものである。

一方で、 $\langle 100 \rangle$  転位は、バーガス・ベクトルの大きさの故にその弾性エネルギーが高く、鉄中に安定に導入できない「高エネルギー転位」とみなされてきた。これに対し、本申請者は、鉄において  $\langle 100 \rangle$  転位を優先的に導入し得ることを示した(荒河: 特許出願 (2016))。

### 2. 研究の目的

本研究では、「高エネルギー  $\langle 100 \rangle$  転位」を優先的に導入するための条件を確立することを目指して、 $\langle 100 \rangle$  転位の様々な性質を、透過電子顕微鏡法 (TEM) を駆使して明らかにすることを目的とした。

ここでは、本研究により得られた代表的な成果を示す。

### 3. 研究の方法

#### (1) 鉄における $\langle 100 \rangle$ 転位間相互作用

いったん導入された  $\langle 100 \rangle$  転位どうしが転位間相互作用によって  $1/2\langle 111 \rangle$  転位に戻ってしまわないか否かを調べた。

$\langle 100 \rangle$  転位導入は、高エネルギー電子照射によっておこなった。高エネルギー電子照射は、大阪大学 超高压電子顕微鏡 (H-3000) を用いて、TEM 薄膜に対して、加速電圧 2000 kV、照射強度  $1 \times 10^{23} \text{ e/m}^2 \cdot \text{s}$ 、照射温度 室温 ~ 450 の範囲でおこなった。照射下での  $\langle 100 \rangle$  転位どうしが合体した場合に起こる反応をその場観察した。

こうして導入された転位を汎用 TEM により観察して、転位の回折コントラストからそれらのバーガス・ベクトルを決定した。

#### (2) 鉄における $\langle 100 \rangle$ プリズマティック転位ループの挙動

プリズマティック転位ループは、塑性変形、急冷、高エネルギー粒子照射等の様々な過程において、過飽和点欠陥の板状集合等によって形成される主要な格子欠陥である。

ここでは、鉄における  $\langle 100 \rangle$  転位ループの挙動に関する研究成果を報告する。

試料には、超高純度鉄 (RRR: 8000) の TEM 薄膜を用いた。 $\langle 100 \rangle$  転位ループの導入は、大阪大学 超高压電子顕微鏡 (H-3000) 内での 2000 keV 電子照射 - 自己格子間原子生成・集合によって行った。転位ループの挙動のその場観察には、新たな点欠陥の生成を伴わない汎用の 200 kV TEM を用いた。転位ループを駆動し得る外部応力が印加されない条件で、試料の加熱下での転位ループの挙動を観察およびビデオ記録した。

### 4. 研究成果

#### (1) 鉄における $\langle 100 \rangle$ 転位間相互作用

高エネルギー電子照射によって、はじき出しにより生成される自己格子間原子の集合体であるプリズマティック転位ループが形成された。転位ループのバーガス・ベクトルは  $\langle 100 \rangle$  であった。それらの転位ループは自己格子間原子の吸収によって成長して、それぞれの長さがミクロンスケールの  $\langle 100 \rangle$  転位組織を形成した。

こうして導入された  $\langle 100 \rangle$  転位どうしが合体した場合の反応を調べた。その結果、

$[100] + [001] \rightarrow [100]$

のような吸収反応が観察された(図 1)。その一方で、

$[100] + [001] \rightarrow [101] + 1/2[111] + 1/2[1-11]$

のような分解反応による  $1/2\langle 111 \rangle$  転位の生成は見いだせなかった。

このことは、いったん形成された  $\langle 100 \rangle$  転位組織が安定であることを示唆する。

#### (2) 鉄における $\langle 100 \rangle$ プリズマティック転位ループの挙動

室温付近で、ほぼ孤立した、コトレル雰囲気をもとわない「裸の」 $\langle 100 \rangle$  刃状転位ループが、そのバーガス・ベクトルに平行な方向へ一次元すべり拡散する様子を観測できた(図 1)。転位ループの位置を追跡して、その一次元変位を時間の関数としてプロットしたところ、図 2 のような結果を得た。その平均二乗変位を時間の関数としてプロットして、その勾配から拡散係数を評価した。こうして求めた  $\langle 100 \rangle$  転位ループの拡散係数を  $1/2\langle 111 \rangle$  転位ループの拡散係数と比較したところ、前者は後者よりも 10 桁程度低かった。この結果は、 $\langle 100 \rangle$  刃状転位

の移動度が  $1/2\langle 111 \rangle$  刃状転位のそれよりも極めて低いことを示す。すなわち、 $\langle 100 \rangle$  転位が  $1/2\langle 111 \rangle$  転位よりも極めて移動しにくいことを改めて示すものである。

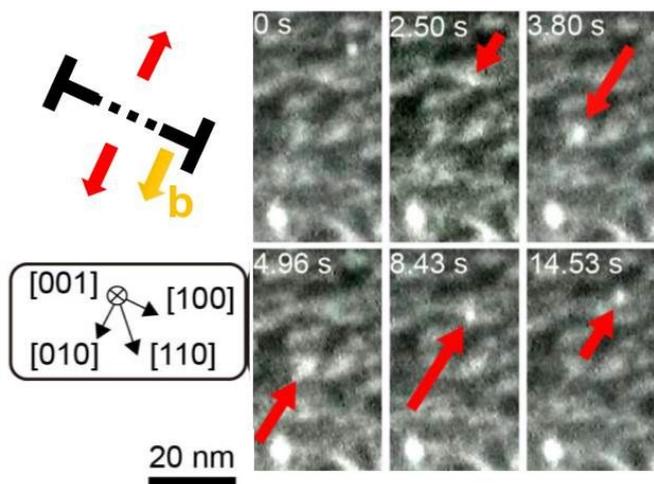


図1 「高エネルギー  $\langle 100 \rangle$  刃状転位ループ」の一次元すべり拡散の様子。

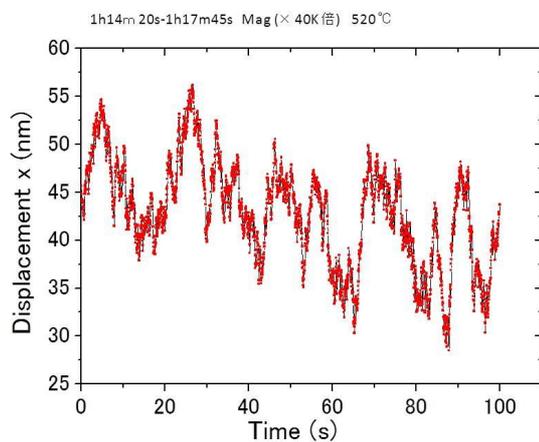


図2 「高エネルギー  $\langle 100 \rangle$  刃状転位ループ」の一次元変位の時間依存性 (時間分解能は 1/30 秒)。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 T. Sano, T. Eimura, A. Hirose, Y. Kawahito, S. Katayama, K. Arakawa, K. Masaki, A. Shiro, T. Shobu, and Y. Sano	4. 巻 9
2. 論文標題 Improving Fatigue Performance of Laser-Welded 2024-T3 Aluminum Alloy Using Dry Laser Peening	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Metals	6. 最初と最後の頁 1192(13pages)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.3390/met9111192">https://doi.org/10.3390/met9111192</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 K. Arakawa, M.-C. Marinica, S. Fitzgerald, L. Proville, D. Nguyen-Manh, S. L. Dudarev, P.-W. Ma, T. D. Swinburne, A. M. Goryaeva, T. Yamada, T. Amino, S. Arai, Y. Yamamoto, K. Higuchi, N. Tanaka, H. Yasuda, T. Yasuda, H. Mori	4. 巻 19
2. 論文標題 Quantum De-trapping and Transport of Heavy Defects in Tungsten	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nature Materials	6. 最初と最後の頁 508-511
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1038/s41563-019-0584-0">https://doi.org/10.1038/s41563-019-0584-0</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 3件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Kazuto Arakawa
2. 発表標題 TEM Studies on Dynamics of Radiation-Produced Defects
3. 学会等名 International Symposium on the Future of Nuclear Materials Research (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 蔭山彰良, 小松正雄, 荒河一渡
2. 発表標題 鉄における水素誘起キャピティと転位の相互作用 (優秀発表賞)
3. 学会等名 日本金属学会・日本鉄鋼協会中国四国支部講演大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 田中颯, 上原一毅, 松本優也, 高井健一, 荒河一渡
2. 発表標題 鉄の変形による転位組織発達へ及ぼす水素の影響
3. 学会等名 日本金属学会・日本鉄鋼協会中国四国支部講演大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 井上喬仁, Thomas Swinburne, Sergei Dudarev, 森博太郎, 保田英洋, 網野岳文, 一色実, 三村耕司, 打越雅仁, 荒河一渡
2. 発表標題 鉄におけるナノ転位ループの二次元上昇運動拡散
3. 学会等名 日本金属学会・日本鉄鋼協会中国四国支部講演大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 福井 健太郎, 野本明義, 小林知裕, 山田進, 小松正雄, 荒河一渡
2. 発表標題 鉄-銅合金における転位挙動の TEM その場観察
3. 学会等名 日本金属学会・日本鉄鋼協会中国四国支部講演大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kazuto Arakawa
2. 発表標題 TEM Observations of Defect Formation under Irradiation
3. 学会等名 6th Fusion Materials Theory & Modeling Workshop, Fusion Materials Technology Cooperation Program (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 荒河一渡
2. 発表標題 金属における格子欠陥のダイナミクスのTEMによる研究
3. 学会等名 2019 年度 日本顕微鏡学会 関西支部 特別講演会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 荒河一渡、蔭山彰良、小松正雄
2. 発表標題 鉄における水素誘起キャピティ挙動のTEMその場観察
3. 学会等名 日本顕微鏡学会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田中颯，荒井重勇，小松 正雄，荒河 一渡
2. 発表標題 鉄中のらせん転位間相互作用のTEM観察（優秀講演賞）
3. 学会等名 金属第59回・鉄鋼第62回中国四国支部講演大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 K. Arakawa and M.P. Short	4. 発行年 2019年
2. 出版社 Springer Nature	5. 総ページ数 14
3. 書名 Experimental Validation of Models: In Situ TEM for Radiation Damage	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----